

## АНОТАЦІЯ

*Комолафе Д. О.* Особливості прояву гіпоксії навантаження у підлітків в залежності від рухової діяльності. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 091 Біологія. – Національний університет фізичного виховання і спорту України, Київ, 2023.

Аналіз та узагальнення сучасної науково-методичної літератури свідчать про недостатнє уявлення стосовно складного процесу просування кисню в організмі і постачання його до працюючих м'язів, ступеня відповідності цього постачання кисневому запиту. Нажаль, такі відомості в основному стосуються дорослих людей.

Передбачається, що виникаюча при фізичних навантаженнях киснева недостатність у підлітків, у зв'язку з пубертатною перебудовою нервово-гуморальних механізмів, може мати свої особливості.

Тому вважаємо, що розуміння механізмів її розвитку і компенсації у підлітків може розширити знання не тільки для теорії гіпоксичних станів і фізіології рухової діяльності, а і може бути використано у практиці підготовки спортсменів.

Мета дослідження. Дослідити особливості РМК, фізіологічні механізми розвитку та компенсації гіпоксії навантаження у підлітків в залежності від їх вікового розвитку і стану фізичної підготовленості.

Методологія дослідження базується на комплексному підході, включаючи дослідження функції зовнішнього дихання, гемодинаміки, поетапного масопереносу  $O_2$  і  $CO_2$ , фізіологічному методі визначення фізичної працездатності, і аналізі можливостей тканинних механізмів споживання кисню при різних ступенях гіпоксії навантаження.

Наукова новизна одержаних результатів. На основі результатів дослідження із використанням інформативних критеріїв оцінки були отримані

нові наукові дані стосовно характеру та відмінностей розвитку і компенсації гіпоксії навантаження у нетренованих підлітків від дорослих, а також від юних спортсменів. Також були отримані нові дані стосовно особливостей розвитку гіпоксії навантаження у підлітків-дівчат з порушеною кисневою ємністю крові при фізичних навантаженнях.

У ході дослідження отримані дані, які мають новизну, зокрема:

*вперше* в наших дослідженнях показано, що виконання однакових за потужністю навантажень підлітками та дорослими відбувається при неоднакових режимах масопереносу кисню (РМК): у підлітків діяльність кардіо-респіраторної системи (КРС) менш ефективна, киснева вартість роботи вища, коефіцієнт корисної дії нижчий;

*вперше* показано що у підлітків, на відміну від дорослих, потужність функціонування системи поетапного переміщення кисню в організмі при фізичних навантаженнях обмежується неможливістю адекватного напруження кардіореспіраторної системи. При цьому ступінь гіпоксії навантаження не досягає таких значень як у дорослих;

*вперше* показано, що у процесі вікового розвитку та в результаті спортивного тренування збільшується потужність системи доставки кисню, підвищується ефективність гемодинаміки щодо забезпечення тканин киснем, розвиваються механізми, що зумовлюють його повну утилізацію з крові;

*вперше* показано, що в результаті зниження кисневої ємності крові при виконанні фізичних навантажень навіть невисокої інтенсивності значно зростає кисневий запит організму, збільшується киснева вартість роботи, більшим виявляється кисневий борг, до більшого ступеня розвивається гіпоксія навантаження.

Результати дослідження *підтверджують* існуючі в науковій літературі дані стосовно відмінностей в системах крові, кровообігу і дихання, які відрізняють підлітків від дорослих і можуть здійснювати вплив на РМК в організмі при м'язовій діяльності.

Контингент досліджуваних: підлітки 13-14 років (16 хлопців), які не займаються спортом, нетреновані дорослі чоловіки 21-28 років (16 осіб), та 16 юних велосипедистів 13-14 років. Для порівняння вікових змін КРС та РМК проведено аналіз отриманих результатів в наших дослідженнях з даними аналогічно приведеними в літературі стосовно дорослих велосипедистів. Також проведено обстеження 14-ті здорових дівчат та 12-ти, які страждають ювенільними порушеннями становлення менструальної функції віком 14-16 років.

Нами було показано, що вдосконалення системи постачання організму киснем з віком та у процесі тренування йде нерівномірно. Дихання, кровообіг та тканинні механізми утилізації кисню розвиваються неоднаково. Проведений нами кореляційний аналіз дозволив виявити, що у підлітковому віці, навіть незважаючи на спортивне тренування, дихання у відношенні забезпечення організму киснем ще не таке ефективне, тоді як ефективність киснетранспортної функції крові (КТФК) ще зберігається. Ефективність підвищується із віком, що ми спостерігали у нетренованих чоловіків. Найефективніші співвідношення спостерігаються у дорослих спортсменів, у яких і зовнішнє дихання, і кровообіг, і КТФК і тканинні механізми утилізації кисню однаковою мірою сприяють збільшенню швидкості споживання кисню.

Зазначені зміни у системі дихання, кровообігу, КТФК призводять до того, що характеристики РМК з віком та у процесі тренування значно змінюються і вдосконалюються. Як показали проведені нами дослідження, РМК нетренованих підлітків при динамічній м'язовій діяльності з максимальною та субмаксимальною інтенсивністю відрізняються від РМК чоловіків нижчим загальним рівнем каскадів швидкості поетапного просування кисню в організмі.

При максимальних навантаженнях ступінь глибини та частоти дихання у підлітків та чоловіків неоднакова, тоді як у останніх у збільшенні легеневої вентиляції (ЛВ) важливе значення має можливість підвищення дихального

об'єму, ніж почастішання дихання. Менша величина ЛВ у підлітків призводить до того, що швидкість надходження кисню в легені у них виявляється нижчою за чоловіків. Дуже важливим показником, що зумовлює меншу швидкість надходження кисню до альвеол у підлітків є невисоке відношення альвеолярної вентиляції та легеневої. Все це призводить до того, що функція зовнішнього дихання у підлітків виявляється недостатньо економічною та ефективною.

Поряд із цим, КТФК у підлітків також менш ефективна. Хоча максимальна ЧСС мало відрізняється у тренуваних підлітків і чоловіків, максимальний хвилинний об'єм крові (ХОК) у підлітків менший. Це пояснюється більш обмеженою здатністю серця збільшувати систолічний об'єм крові (СО) при м'язовій діяльності.

Менша швидкість кровотоку не забезпечує необхідної швидкості транспорту кисню з артеріальною кров'ю, проте збільшення споживання кисню у підлітків обмежується не тільки низькою швидкістю доставки кисню до працюючих м'язів, але і меншими можливостями його використання тканинами. У зв'язку з меншою утилізацією кисню, у підлітків артеріо-венозна відмінність за киснем під час фізичного навантаження нижче, а не використаний запас кисню у змішаній венозній крові по відношенню до споживання кисню вищий, ніж у чоловіків., тобто в них обмежена можливість використання кисневого резерву. Зниження напруги кисню в змішаній венозній крові у підлітків свідчило про розвиток тканинної гіпоксії.

Суттєві відмінності РМК та КТФК при динамічній м'язовій діяльності виявлені не тільки у нетренуваних підлітків та дорослих, але ще й більшою мірою у юних спортсменів. Проведені дослідження показали, що внаслідок занять спортом значно підвищується швидкість поетапної доставки кисню до тканин. Поряд із збільшеною доставкою кисню тканинам швидкість його транспорту змішаною венозною кров'ю стає меншою. Ще більше знижується співвідношення між кількісним поетапним рухом кисню в організмі зі

швидкістю його споживання, що наряду з підвищеною потужністю кисенево-транспортної системи організму свідчить про високу її ефективність. Навантаження з МСК дорослими спортсменами виконуються за меншої інтенсивності надходження кисню до легень та альвеол та однакової інтенсивності транспорту його артеріальною кров'ю. Інтенсивність споживання кисню у дорослих вища за рахунок кращої утилізації кисню тканинами, в результаті чого транспорт кисню змішаною венозною кров'ю у них значно нижчий.

Таким чином, в результаті спортивного тренування не тільки у зрілому, а й у підлітковому віці ефективність та економічність КТФК при МСК значно підвищується. Внаслідок занять спортом у підлітковому віці значно збільшується коефіцієнт використання кисню тканинами з артеріальної крові. Краще використання кисню призводить до того, що гемодинамічний еквівалент стає нижчим: у нетренованих підлітків кожен літр кисню вилучався тканинами з 9,2 літрів циркулюючої крові, у чоловіків - з 8,8, у юних велосипедистів – з 8,0, а у дорослих спортсменів - лише 6,8 літрів. Поряд з цим у нетренованих як підлітків, так і дорослих максимальні величини ХОК нижчі, ніж у юних і дорослих спортсменів, що пояснюється меншими можливостями збільшення  $\dot{V}O_2$ . У дорослих спортсменів кисневий ефект серцевого скорочення значно більший, ніж у тренуваних підлітків та нетренованих чоловіків.

Велика економічність та ефективність КТФК спортсменів знаходять собі пояснення у розвитку механізмів, які забезпечують повнішу утилізацією кисню тканинами. Незважаючи на те, що спортсмени при фізичному навантаженні зазнають великої артеріальної гіпоксемії, рівень напруження кисню в артеріальній крові у них більший ніж у нетренованих.

Більш низькі величини вмісту кисню у змішаній венозній крові свідчать про те, що артеріо-венозна відмінність за киснем у спортсменів у процесі м'язової діяльності збільшується більше.

У той самий час швидкість споживання кисню підвищується і в нетренованих і у спортсменів переважно за рахунок збільшення швидкості транспорту кисню артеріальною кров'ю. Більш високі артеріо-венозна відмінність за киснем і коефіцієнт його використання тканинами призводять до того, що швидкість транспорту кисню змішаною венозною кров'ю, незважаючи на підвищений ХОК, у спортсменів і особливо у дорослих виявляється на нижчому рівні. Зазначений факт видається дуже важливим і вказує на те, що у нетренованих підлітків та у чоловіків у порівнянні зі спортсменами швидкість споживання кисню обмежується не тільки неможливістю збільшувати швидкість доставки кисню до тканин, але також меншою здатністю його використання. Якщо порівняти навіть юних велосипедистів із дорослими спортсменами, то виявляється, що підвищення коефіцієнта утилізації кисню сприяло б збільшенню його споживання на 400-450 мл/хв, а швидкість транспорту кисню змішаною венозною кров'ю була б такою, як у дорослих спортсменів. Безпосередньо після припинення роботи вміст кисню в артеріальній крові і, особливо, змішаній венозній підвищується досить швидко, при цьому швидкість транспорту кисню артеріальною кров'ю відразу знижується, що більшою мірою проявляється у спортсменів.

Дослідження та порівняння, які ми провели у даній роботі, а також практичне застосування комплексного методу при обстеженні юних велосипедистів по велоспорту показали його високу придатність та великі переваги перед загальноприйнятим фізіологічним критерієм оцінки аеробної продуктивності тільки за показником МСК.

Проведені нами дослідження показали, що лабораторні комплексні прямі визначення рівня фізичної працездатності, а також МСК є більш інформативними, ніж розрахункові, як для підлітків різного ступеня фізичної тренуваності так і дорослих.

Також комплексний аналітичний підхід для визначення режимів масопереносу кисню при фізичних навантаженнях різної потужності показав,

що він дозволяє досить ретельно зробити оцінку функціонального стану та ступеня фізичної тренуваності та може бути успішно застосованим для контролю за станом організму.

Нам вдалося дослідити вплив змін КЄК, що визначається вмістом гемоглобіну в крові, на постачання кисню до працюючих тканин. Отримані в процесі проведеного дослідження дані підтверджують результати теоретичних положень про роль кисневої ємності крові у регуляції процесу масопереносу та утилізації кисню при м'язовій діяльності. Тобто, в результаті зниження концентрації гемоглобіну при виконанні фізичних навантажень навіть невисокої інтенсивності зростає, порівняно з тим, що спостерігається зазвичай у здорових осіб, кисневий запит організму, збільшується киснева вартість роботи, більшим виявляється кисневий борг.

За результатами роботи отримано акт впровадження основних положень, що витікають з дисертаційного дослідження, в навчальний процес профільної кафедри НУФВС України.

Також, отримані дані можуть бути використаними спортивними фізіологам та лікарями, здійснювати контроль за функціональним станом спортсменів, визначати функціональні резерви організму, прогнозувати шляхи їх реалізації.

**Ключові слова:** киснева недостатність, фізична працездатність, максимальне споживання кисню, м'язова діяльність, киснева ємність крові, масопереносу кисню та його споживання, киснево-транспортна функція крові, гіпоксія навантаження.

## SUMMARY

*Komolafe D.* Peculiarities of the manifestation of exercise-induced hypoxia of teenagers depending on motor activity. – Scientific qualification work with manuscript rights.

Dissertation for the Doctor of Philosophy degree in 091 - Biology. – National University of Ukraine on Physical Education and Sport, Kyiv, 2023.

The analysis and generalization of modern scientific and methodical literature indicate insufficient understanding of the complex process of oxygen promotion in the body and its supply to working muscles, the level of compliance of this supply with the oxygen demand. Unfortunately, such information mainly concerns adults.

It is assumed that the lack of oxygen arising during physical exertion of teenagers, in connection with the pubertal restructuring of the neuro-humoral mechanisms, may have its own characteristics.

Therefore, we believe that understanding the mechanisms of its development and compensation of teenagers can expand knowledge not only for the theory of hypoxic states and the physiology of motor activity, but also can be used in the practice of training athletes.

The aim of the study. To investigate the features of the modes of oxygen transport, physiological mechanisms of development and compensation of hypoxia load in adolescents depending on their age development and state of physical fitness.

The research methodology is based on a comprehensive approach, including research on the function of external respiration, hemodynamics, phased mass transfer of O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>, a physiological method of determining physical capacity, and an analysis of the possibilities of tissue mechanisms of oxygen consumption at different levels of hypoxia load.

Scientific novelty of the obtained results. Based on the results of the study using informative evaluation criteria, new scientific data were obtained regarding the nature and differences in the development and compensation of hypoxia of the load of untrained teenagers from adults, as well as from young athletes. Also, new



data were obtained regarding the peculiarities of the development of exercise hypoxia in teenage girls with impaired blood oxygen capacity during exercise.

In the course of the research, new data were obtained, in particular:

for the first time in the experiment, it was shown that performance of loads of the same power by teenagers and adults takes place with unequal mode of oxygen mass transfer (MOMT): for teenagers, the activity of the cardio-respiratory system (CRS) is less effective, the oxygen cost of work is higher, the efficiency ratio is lower;

it was shown for the first time that for teenagers compare to adults the power of functioning of the system of gradual movement of oxygen in the body during physical exertion is limited by the impossibility of adequate stress on the cardiorespiratory system. At the same time, the level of hypoxia of the load does not reach such values as for adults;

it was shown for the first time that in the process of age development and as a result of sports training, the capacity of the oxygen delivery system increases, the efficiency of hemodynamics increases in the provision of tissues with oxygen, and the mechanisms that cause its complete utilization from the blood develop;

it was shown for the first time that as a result of a decrease in the oxygen capacity of the blood during physical exertion, even of low intensity, the oxygen demand of the body increases significantly, the oxygen cost of work increases, the oxygen debt becomes greater, and hypoxia of the load develops to a greater degree.

The results of the study confirm the data available in the scientific literature regarding the differences in the Circulatory and Respiratory Systems, which distinguish teenagers from adults and can influence the MOMT of the body during muscle activity.

Subjects: teenagers 13-14 years old who do not play sports, untrained adult men 21-28 years old, and 16 young cyclists. In order to compare the age-related changes in the CRS and MOMT, an analysis of the results obtained in our studies with data similarly given in the literature for adult cyclists was carried out. An

examination of 14 healthy girls and 12 suffering from juvenile disorders of menstrual function was also carried out.

We have shown that the improvement of the body's oxygen supply system is uneven. Breathing, blood circulation and tissue oxygen utilization mechanisms develop differently with age and during training. Our correlational analysis revealed that during teenage age, despite sports training, breathing is not yet so effective in terms of supplying the body with oxygen, while the efficiency of the oxygen transport function of the blood (OTFB) is still preserved. Performance increases with age, which we observed for untrained men. The most effective ratios are observed for adult athletes, for whom both external breathing, blood circulation, and OTFB and tissue oxygen utilization mechanisms equally contribute to increasing the rate of oxygen consumption.

The specified changes in the respiratory system, blood circulation, OTFB lead to the fact that the characteristics of the MOMT with age and during training significantly change and improve. As our studies have shown, the MOMT of untrained teenagers during dynamic muscle activity with maximum and submaximal intensity differ from the MOMT of men by a lower overall level of cascades of the speed of stepwise advancement of oxygen in the body.

At maximum loads, the degree of depth and frequency of breathing of teenagers and men is the same, while in the latter, in increasing lung ventilation (LV), the ability to increase the respiratory volume is more important than increasing the frequency of breathing. The smaller value of LV of teenagers leads to the fact that the rate of oxygen entering the lungs is lower than is for men. A low ratio of alveolar ventilation and lung ventilation is a very important indicator that causes a lower rate of oxygen delivery to the alveoli of teenagers. All this leads to the fact that the function of external breathing for teenagers is insufficiently economical and efficient.

Along with this, OTFB is also less effective for teenagers. Although maximum heart rate is little different between trained teenagers and men, maximal

minute blood volume (MBV) is lower for teenagers. This is explained by the more limited ability of the heart to increase the systolic blood volume (SBV) during muscle activity.

The lower velocity of blood flow does not provide the necessary speed of oxygen transport with arterial blood, however, the increase in oxygen consumption for teenagers is limited not only by the low speed of oxygen delivery to the working muscles, but also by lower possibilities of its use by tissues. Due to lower utilization of oxygen, the arterio-venous difference in oxygen during exercise is lower for teenagers, and the used oxygen supply in the mixed venous blood in relation to oxygen consumption is higher than for men, i.e. they have a limited ability to use oxygen reserve. A decrease in oxygen tension in mixed venous blood for teenagers indicated the development of tissue hypoxia.

Significant differences for the MOMT and OTFB during dynamic muscle activity were found not only for untrained teenagers and adults, but also to a greater extent in young athletes. Conducted studies have shown that as a result of sports, the rate of gradual delivery of oxygen to tissues significantly increases. Along with the increased delivery of oxygen to the tissues, the rate of its transport by mixed venous blood becomes lower. The ratio between the quantitative step-by-step movement of oxygen in the body and the rate of its consumption decreases even more, which, along with the increased power of the body's oxygen transport system, indicates its high efficiency. Loads with  $VO_2$  max by adult athletes are performed with a lower intensity of oxygen supply to the lungs and alveoli and the same intensity of its transport by arterial blood. The intensity of oxygen consumption for adults is higher due to better utilization of oxygen by tissues, as a result of which oxygen transport by mixed venous blood is significantly lower in them.

Thus, as a result of sports training, not only in adulthood, but also in teenage age, the effectiveness and cost-effectiveness of OTFB at  $VO_2$  max significantly increases. As a result of playing sports in teenage age, the rate of oxygen utilization by tissues from arterial blood increases significantly. The better use of oxygen leads

to the fact that the hemodynamic equivalent becomes lower: for untrained teenagers, each liter of oxygen was removed by tissues from 9.2 liters of circulating blood, for men - from 8.8, for young cyclists - from 8.0, and for adult athletes - only 6.8 liters. Along with this for untrained teenagers and adults the maximum values of MBV are lower than for young and adult athletes, which is explained by the smaller possibilities of increasing SBV. For adult athletes the oxygen effect of heart contraction is significantly greater than for trained teenagers and untrained men.

The high cost-effectiveness and efficiency of sportsmen's OTFB are explained in the development of mechanisms that ensure a more complete utilization of oxygen by tissues. Despite the fact that during physical exertion, athletes experience severe arterial hypoxemia, the level of oxygen tension in their arterial blood is higher than that of untrained athletes.

Lower levels of oxygen content in mixed venous blood indicate that the arterio-venous difference in oxygen for athletes increases more in the process of muscle activity.

At the same time, the rate of oxygen consumption increases for untrained people and for athletes mainly due to an increase in the rate of oxygen transport by arterial blood. Higher arterio-venous difference in oxygen and the coefficient of its use by tissues lead to the fact that the speed of oxygen transport by mixed venous blood, despite the increased MBV for athletes and especially for adults is at a lower level. This fact appears to be very important and indicates that for untrained teenagers and men, compared to athletes, the rate of oxygen consumption is limited not only by the inability to increase the rate of oxygen delivery to tissues, but also by a lower ability to use it. If we compare even young cyclists with adult athletes, it turns out that an increase in the utilization rate of oxygen would contribute to an increase in its consumption by 400-450 ml/min, and the speed of oxygen transport by mixed venous blood would be the same as for adult athletes. Immediately after the cessation of work, the oxygen content in arterial blood and, especially, in mixed

venous blood increases quite quickly, while the speed of oxygen transport in arterial blood immediately decreases, which is more pronounced in athletes.

The research and comparison that we conducted in this summary, as well as the practical application of the complex method during the examination of young cyclists in cycling, showed its high suitability and great advantages over the generally accepted physiological criterion for assessing aerobic performance based only on the  $VO_2$  max indicator.

Our studies have shown that laboratory direct determinations of the level of physical fitness, as well as  $VO_2$  max, are more informative than calculated ones, both for teenagers of various levels of physical fitness and for adults.

Also, a complex analytical approach to determine oxygen mass transfer modes during physical exertion of different power has shown that it allows for a fairly thorough assessment of the functional state and degree of physical training and can be successfully applied to monitor the body's condition and level of training.

We were able to investigate the effect of changes in oxygen carrying capacity blood, which is determined by the hemoglobin content in the blood, on the supply of oxygen to working tissues. The data obtained in the course of the conducted research confirm the results of theoretical statements about the role of the oxygen capacity of the blood in the regulation of the process of mass transfer and utilization of oxygen during muscle activity. That is, as a result of a decrease in the concentration of hemoglobin during exercise, even of low intensity, the body's oxygen demand increases, compared to what is usually observed in healthy individuals, the oxygen cost of work increases, and the oxygen debt turns out to be greater.

According to the results of the work, an act of implementation of the main provisions arising from the dissertation research into the educational process of the specialized department of the National Academy of Sciences of Ukraine was obtained.

Also, the obtained data can be used by sports physiologists and doctors to monitor the functional state of athletes, determine the functional reserves of the body, and predict ways of their implementation.

**Key words:** oxygen deficiency, physical capacity, maximum oxygen consumption, muscle activity, blood oxygen capacity, oxygen mass transfer and its consumption, blood oxygen transport function, hypoxia of the load.